Técnicas de computación electrónica en geología

T. Victor Loudon

El análisis, interpretación y archivo de la gran masa de datos con que se enfrentan los geólogos hace que recurran cada vez más al uso de las técnicas de computación electrónica. Aunque éstas tienen mucho en común con las empleadas en otras ramas de la ciencia, se han tenido que desarrollar métodos especiales que afectan a la distribución de datos en el espacio y el tiempo, para su aplicación a las ciencias de la Tierra.

Los geólogos se ocupan fundamentalmente de las propiedades de las rocas y minerales de la corteza terrestre, su historia y procesos de su formación y transformación. Los métodos tradicionales de exploración geológica requieren mucha repetición de esfuerzos. Generalmente, en la cartografía inicial o en la reinterpretación de un área, se recogen al azar datos sin elaborar, para un fin muy específico. El geólogo observa mucho más de lo que registra, registra más de lo que comunica a sus colegas y publica sólo una descripción condensada, subrayando los puntos interesantes para las interpretaciones que estima acertadas. En este proceso descarta observaciones poco significativas o ya conocidas. Sin embargo, para muchos problemas geológicos sería posible obtener más información que la que un geólogo pudiera aspirar a recoger en su vida.

En tal situación son indudablemente interesantes las ventajas que puede proporcionar el uso de la computadora. La disponibilidad de datos significativos, detallados y diferentes, puede ayudar a orientar la exploración hacia la obtención de nuevos datos importantes. El poder y capacidad de una computadora puede utilizarse para integrar datos sin elaborar de muchas áreas, empleando una gama amplia de posibles modelos. También pueden contrastarse y desarrollarse nuevas interpretaciones como modelos matemáticos, a la luz de los avances en la teoría geológica. Pero el tiempo invertido y el costo de estos desarrollos puede ser considerable, porque implica un cambio en los métodos geológicos.

Las técnicas de computación se utilizan ahora en gran escala por los geólogos. Las áreas de actividad comprenden: archivo de información y recuperación, análisis estadístico, análisis de las superficies geológicas y datos contenidos en los mapas, análisis de los datos de orientación y simulación de procesos geológicos.

El campo de la geología

Aunque en este país trabajan varios centenares de geólogos [2, 3], y decenas de millares en los Estados Unidos y en Rusia, sólo una pequeña parte de la corteza de la Tierra ha sido suficientemente estudiada para permitir confeccionar un mapa geológico detallado. Incluso en el Reino Unido es todavía necesario confeccionar mucha cartografía geológica básica con la información reciente obtenida de sondeos y excavaciones. El petróleo y las industrias mineras son las actividades que mayor número de geólogos emplean, pero en Inglaterra, como en todas partes, la búsqueda de materiales ordinarios, tales como agua, arena, grava y piedra para construcción y carreteras, es un aspecto de la geología en incesante incremento. También es importante la geología en la planificación de obras de ingeniería civil.

Dunham [2, 3] describe la reciente evolución de la geología desde una ciencia en que las principales herramientas eran el martillo y el microscopio, hasta ahora que se usa una amplia variedad de instrumentos complejos. Los reconocimientos magnéticos, eléctricos, sísmicos y de gravedad revelan la naturaleza y estructura de las rocas muy por debajo de la superficie de la Tierra. Los modernos equipos geoquímicos pueden proporcionar un análisis químico detallado de una muestra de roca, en unos pocos minutos y fijar la edad de una roca determinando exactamente el contenido en productos de desintegración radiactiva.

La disponibilidad de un equipo analítico complejo, especialmente en geofísica y geoquímica, ha estimulado el uso de las computadoras, que proporcionan un medio de reducir la tediosa y larga tarea de corregir e interpretar resultados. A su vez, las computadoras han estimulado el uso de instrumentos analíticos, por su posibilidad de asimilar las masas de datos suministrados por los instrumentos. Actualmente, los geoquímicos y geofísicos son los que más activamente contribuyen al desarrollo y utilización de las técnicas de computación.

Archivo y recuperación de la información geológica

Como en otras disciplinas, la computadora se ha usado para el manejo de la información bibliográfica. Los métodos de computación se vienen usando, por ejemplo, en la preparación de la *Bibliography and Index of Geology*. En Norte América, varias organizaciones comerciales, así como algunos gobiernos de estados y provincias, registran los datos geológicos y los suministran a las compañías petrolíferas en forma utilizable en las computadoras. Los *Geological Surveys* de Estados Unidos y Canadá se dedican intensamente a procesar sus datos en las computadoras. En Canadá se ha propuesto crear un organismo estatal para estimular la coordinación de las colecciones de documentos de las computadoras referentes a la geología canadiense. En Inglaterra existe el plan de crear un «Banco Nacional de Datos para la Ciencia de la Tierra», dentro del *Institute of Geological Sciences*, y proyectos similares existen o se estudian en otros muchos países. En otras ramas de la ciencia de la Tierra, como oceanografía, sismología y geomagnetismo, los esquemas de archivo y recuperación están aún más avanzados que en geología, y se está operando en ellos a escala mundial.

La computadora, al permitir a los geólogos comunicarse a un nuevo nivel, ha introducido un nuevo factor

T. Victor Loudon

Nació en 1935 y estudió en la Universidad de Edimburgo, en donde se graduó en geología en 1956. Después de cuatro años como técnico geólogo del petróleo en el oeste del Canadá, regresó a la Universidad de Edimburgo para iniciar una investigación sobre aplicaciones geológicas de las computadoras, que continuó como investigación post-doctoral asociado a la *Northwestern University* de Illinois y a la Universidad de Reading, Inglaterra. Desde enero de 1969 está a cargo de las funciones de enlace con la sección de computadoras en el *Institute of Geological Sciences*.

ENDEAVOUR. XXIX. 108. OCT. 70.

en la geología. Ahora existe la posibilidad de reunir y registrar datos que posteriormente pueden ser analizados de varias maneras por los geólogos, bajo diferentes hipótesis. Esto se basa en la introducción de métodos sistemáticos y reproducibles para reunir y registrar los datos geológicos. Mas el éxito en este campo está lejos de ser completo, y no se ha alcanzado todavía un acuerdo sobre una nomenclatura normalizada, ni sobre las observaciones básicas que los geólogos puedan hacer, ni sobre procedimientos apropiados de muestreo. La Unión Internacional de Ciencias Geológicas ha designado un comité internacional para examinar el archivo, procesado automático y recuperación de datos geológicos. Investigaciones similares de alcance nacional se han emprendido en varios países. Los métodos y problemas de información, archivo y recuperación descritos, son generales. En las ciencias de la Tierra, el mapa es otra herramienta tradicional para recoger e intercambiar información. La computadora ha tomado ya parte en esta función, pero el mapa conserva su importancia para expresar la interpretación geológica.

Los mapas geológicos y la computadora

En un campo petrolífero puede haber miles de sondeos profundos, y el trabajo del geólogo de petróleo consiste en ayudar en la busca de nuevas estructuras petrolíferas, interpretando la vasta cantidad de datos geológicos disponibles. La síntesis de los datos para poner de manifiesto las características geológicas se realiza normalmente confeccionando mapas que ilustran las variaciones de posición, potencia y otras propiedades de las formaciones geológicas. A medida que se perforan nuevos sondeos, los mapas deben ser puestos al día. Es práctica común de las compañías petrolíferas utilizar las bandas magnéticas archivadas con los datos de los sondeos, para obtener en una computadora mapas y cortes geológicos específicos para un área y formación determinadas. Los valores de los datos pueden simplemente situarse en su correcta posición y dejar al geólogo su interpretación. En la sección siguiente se describen con más detalle los procesos matemáticos que pueden utilizarse también para análisis y delimitación automática de los datos. El geólogo, generalmente, corrige los mapas preparados por la computadora para obtener versiones finales que incorporan sus propias ideas geológicas. La computadora, no sólo libera al geólogo de los largos trabajos de gabinete para la confección del mapa, sino que le permite usar, para analizar éste, procesos estadísticos impracticables por métodos manuales.

El geólogo de campo que trabaja sobre los afloramientos de rocas, prepara mapas que muestran, entre otras cosas, límites, observados o supuestos, entre formaciones, fallas, clases de rocas y orientación de características tales como la estratificación; pero el dibujo manual del mapa final es un proceso caro y tedioso. Se ha estudiado la manipulación en la computadora de mapas de diferentes clases, incluso los geológicos [1]. La información de los mapas de campo puede digitalizarse automáticamente para registrar un flujo de coordenadas de puntos próximos a lo largo de cada línea. Los registros pueden obtenerse en la computadora y seleccionar la información necesaria para un determinado mapa, a la escala deseada y con la proyección y cantidad de detalle requerida por el usuario. Las posibilidades de obtener y actualizar una serie de datos cartográficos de los registros de una computadora son de gran importancia en las ciencias geográficas y afines, y permiten obtener rápida y económicamente mapas independientes para una necesidad específica (figura 1).

Las fallas, superficies a lo largo de las que se ha producido un movimiento que rompe la continuidad de los estratos cortados por aquéllas, tienen importancia en la minería del carbón, porque limitan la extensión a la que la capa de carbón puede ser explotada con continuidad. En los planos de minas, las fallas se dibujan con líneas como en un mapa geológico de superficie. El *British National Coal Board* patrocina un proyecto de investigación en el que se estudian los tipos de fallas, analizándolas en una computadora. Las líneas que representan fallas se digitalizan, y con esta información digital, la computadora genera un campo en el que el valor de un punto refleja una propiedad, tal como la densidad media de fallas, longitud u orientación, dentro de un área reducida. Estos datos, que forman un conjunto de líneas, se utilizan para obtener una distribución continua que puede ser analizada por los métodos que se describen a continuación.

Métodos estadísticos

En geología se vienen aplicando extensamente los métodos estadísticos normalizados [5, 7]. Frecuentemente afectan a muchas medidas de un número grande de variables; por lo tanto, es indispensable una computadora. El análisis de la variancia se ha utilizado para estudiar la variación total del tamaño de una muestra de guijarros de playa, refiriéndose la variación a factores tales como localidad, posición en la playa, estación del año y geólogo que ha efectuado las medidas. Se han empleado análisis de conjuntos para determinar facies de rocas, descomponiendo un grupo heterogéneo en tipos en los que las características litológicas son sensiblemente uniformes. En geoquímica se han aplicado análisis de correlación, factor y componente principal, con la esperanza de descubrir grupos de elementos que varien en las mismas proporciones y que posiblemente reflejen la composición de los materiales de origen.

Un problema importante para los datos de las ciencias de la Tierra es que las variables obedecen a un esquema de distribución espacial. Las relaciones entre las variables se han de estudiar teniendo en cuenta estos esquemas. Por tanto, no es extraño que en la geología matemática se haya subrayado la descripción de las variables de distribución espacial, algunos de cuyos ejemplos hemos mencionado antes. Aunque basados en métodos estadísticos, se han introducido alteraciones tan grandes que muchos de los procedimientos son más familiares a los geólogos y geofísicos que a los estadísticos.

Una variable en el espacio es comparable en algunos aspectos a una variable en el tiempo. Algunos de los métodos estadísticos desarrollados para analizar series de tiempo pueden aplicarse también a distribuciones espaciales. Pero la variable en el espacio ha de considerarse normalmente en dos o tres dimensiones; mientras que el tiempo fluye en una sola dirección, de modo que un suceso puede depender de otro anterior pero no de uno posterior, en el espacio no se produce normalmente esta asimetría.

El análisis espectral es un método que se ha aplicado con éxito a las variables geológicas. Así como un sonido puede descomponerse en diferentes frecuencias, una

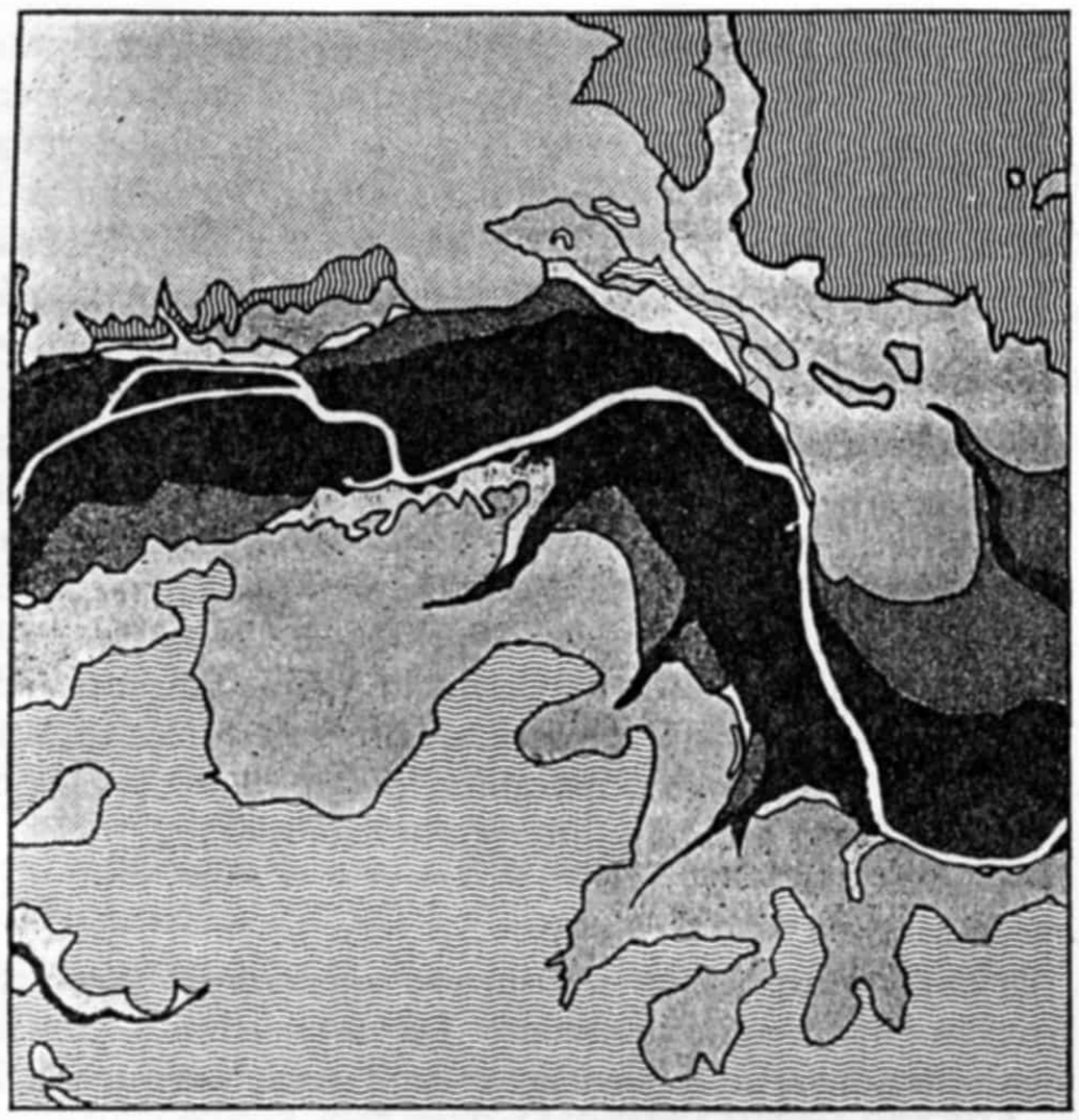

Figura 1 Mapa geológico preparado con la información de un registro magnético en la *Experimental Cartography Unit*. Las manchas de cada formación geológica se han obtenido con un aparato reproductor controlado por una computadora. Las formaciones diferenciadas en esta reproducción por tintas o símbolos, están representadas en el original por colores diferentes [1].

superficie geológica plegada y deformada puede ser analizada en ondas componentes de diferente longitud, amplitud y orientación. J. E. Robinson [8] ha analizado de esta manera superficies; y también ha utilizado filtros para examinar la forma de la superficie cuando se ha prescindido de algunas de las ondas componentes. Eliminando el efecto de las deformaciones regionales, pueden resultar más claras e incluso ponerse de manifiesto por primera vez estructuras locales capaces de contener petróleo y gas.

Posiblemente la técnica computacional que con más frecuencia ha sido utilizada en geología es el análisis de las superficies representativas de tendencias (*trend-surface analysis*), con el fin de diferenciar variaciones regionales y locales [4]. En el análisis de las superficies representativas de tendencias, una función polinómica bidimensional permite, por métodos normalizados regresivos, obtener un conjunto de valores de alguna variable, tal como la posición o la potencia de una formación, con un número de puntos localizados por coordenadas x e y. Las medidas pueden haberse tomado según una cuadrícula regular, pero lo más frecuente es que se distribuyan irregularmente según la ubicación de los sondeos. El tipo de polinomio, generalmente una serie de potencias de segundo o tercer grado, que representa convenientemente la componente regional o superficie representativa de tendencias, se fija mediante una experiencia previa o por ensayos sucesivos; los parámetros del polinomio se calculan a base de mínimos cuadrados. La superficie representativa de tendencias tiene un valor en cada punto dentro del área y puede obtenerse su mapa de contornos en la computadora Fig. 2.

De no utilizarse un polinomio de grado muy elevado, las medidas originales difieren algo de la superficie de tendencias. Las características de las desviaciones o diferencias representan anomalías o caracteres locales que pueden tener importancia económica, pero que no siempre son reconocibles en la observación directa de los datos originales. Se ha intentado realizar manualmente procedimientos similares, pero sin la computadora es difícil obtener resultados satisfactorios en un tiempo razonable. La superficie representativa de tendencias, y la cantidad que de ella se desvian los datos de los puntos, pueden ayudar a obtener una representación regional no enmascarada por el detalle local.

El análisis de la superficie representativa de tendencias es un útil preliminar para estudiar las relaciones entre variables. Una elevada proporción en el contenido de magnesio en la pizarra de una formación puede ser el resultado de la coincidencia de dos tendencias de gran escala y ser debido en gran parte a la elección del área de muestreo. Por consiguiente, el conocimiento de las tendencias regionales ayuda a la interpretación de estas correlaciones.

Los métodos de análisis de series-tiempo son más directamente aplicables a las secciones medidas de estratos. El geólogo que trabaja sobre testigos de sondeos o sobre rocas de afloramientos compone un registro que indica la naturaleza y espesor de las sucesivas unidades de rocas. Las mediciones cuantitativas pueden hacerse de manera continua con un equipo registrador, o a intervalos periódicos. Si los datos son enteramente cualitativos, tales como tipos de rocas, se puede preparar un cuadro de frecuencias de variación — reuniendo, por ejemplo, el porcentaje de lechos de arenisca recubiertos por caliza — que resuma el tipo de deposición en la sección. Para tratar de explicar estas características, los geólogos han utilizado modelos de «itinerarios al azar» en los que la probabilidad de encontrar una determinada litología no depende de la naturaleza de la capa inferior, y modelos de «cadena Markov», en los que sí depende. Las computadoras han hecho practicable ensayar varios de estos modelos y se han obtenido ya resultados importantes que arrojan luz sobre las condiciones locales de deposición.

Datos de orientación, de dos dimensiones, tales como las características que indiquen la dirección de la corriente de sedimentación en un lecho de arenisca, o de tres dimensiones, como la posición de una superficie de estratificación en un área de plegamiento, son frecuentemente de gran importancia en geología. La distribución de la frecuencia de los datos de orientación no parece que haya sido estudiada intensamente por los estadísticos, aunque tiene importancia práctica en la ciencia de la Tierra. G. S. Watson [9], matemático que ha trabajado en este campo, resume en un reciente artículo los últimos progresos. Estos derivan de un trabajo anterior de R. A. Fisher, en el que los datos de orientación se consideraban como vectores que partían del centro de una esfera. El valor medio y la dispersión de la distribución pueden sintetizarse en la orientación y longitud del vector resultante. En geología, sólo usando computadoras pueden aplicarse estos métodos a grandes cantidades de datos de orientación.

Simulación de procesos geológicos

El análisis estadístico puede resultar útil en la interpretación geológica cuando se dispone de cantidad suficiente de datos. Sin embargo, el análisis de los datos, por sí solo, no proporciona una conclusión geológica. Las

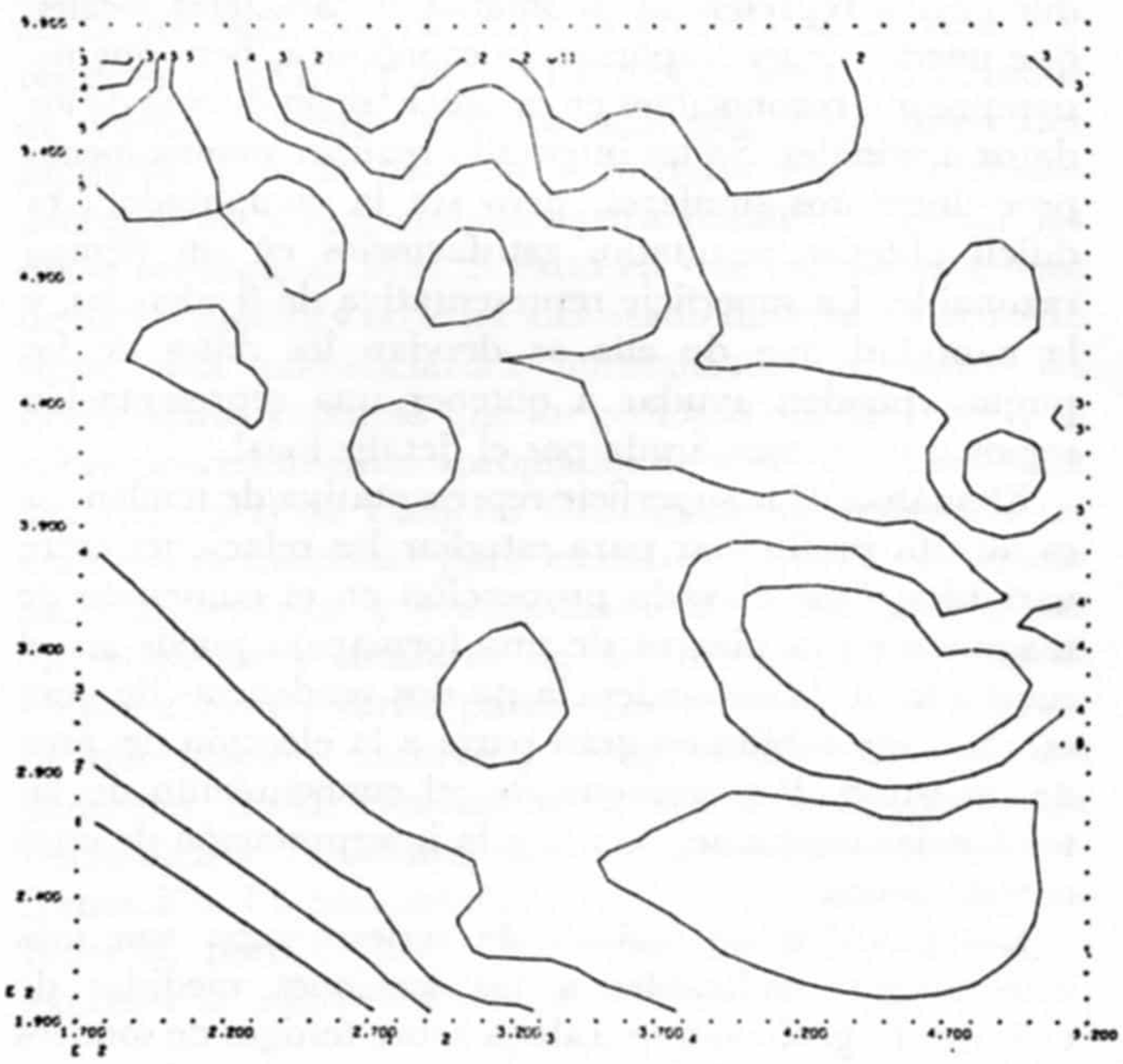

Figura 2 Mapa de contornos preparado en una computadora a base de cotas de altura, registradas en fichas perforadas.

predicciones estadísticas pueden ser completamente engañosas si no van respaldadas por un conocimiento geológico. Un proceso geológico suele contener un elemento de azar, y pueden obtenerse diferentes combinaciones de procesos que conduzcan al mismo resultado geológico. Así pues, no es posible deducir una causa única para un determinado efecto, y la interpretación está basada generalmente en un razonamiento intuitivo. Se puede considerar una serie de hipótesis dentro del cuadro general, que pueden dar una explicación sencilla de las observaciones. La interpretación final puede adoptar la forma de la historia de una sucesión de fenómenos cuya última consecuencia está de acuerdo con el conocimiento de la actual situación geológica.

Las hipótesis geológicas se basan frecuentemente en analogías entre el pasado y el presente. Pero normalmente no podemos comprobar esto con un experimento controlado, porque los procesos geológicos que han afectado a la corteza de la Tierra durante millones de años no pueden reproducirse a escala en el laboratorio. En ciertos campos son útiles modelos físicos a escala reducida, como para estudiar la sedimentación en un estuario, pero no se han utilizado para estudiar el pasado geológico. La mayor parte de las interpretaciones geológicas, hasta cuando se refieren a una investigación cuantitativa detallada, son puramente descriptivas.

Se han hecho varios intentos para reducir la disparidad entre la naturaleza cuantitativa de los datos y la cualitativa de las hipótesis. Una de las aproximaciones más prometedoras ha sido cuantificar las hipótesis y representarlas como un modelo matemático para su simulación en una computadora [4]. Pueden incluirse en el modelo elementos indeterminados, para hacerlo más real, y entonces la consecuencia de la simulación variará de unas premisas a otras. También pueden alterarse en el modelo los parámetros entre series, para determinar su influencia en los resultados. Los de una serie de premisas pueden analizarse estadísticamente y compararse con estadísticas deducidas de los datos reales. Los geólogos han empleado experimentos matemáticos de esta clase para determinar si los datos concuerdan con las hipótesis. A pesar de la espectacular diferencia de la escala de tiempos, en que los millones de años del tiempo geológico se representan en milésimas de segundo en la computadora, el tiempo de computación es todavía considerable. Por consiguiente, los geólogos se contentan normalmente con la inspección visual de un pequeño número de series de simulación, sin intentar un análisis estadístico completo. Tal vez a causa de la dificultad de expresar una hipótesis geológica en términos matemáticos no familiares la simulación no se ha utilizado ampliamente por los geólogos. No obstante, la perspectiva de combinar el conocimiento cuantitativo de los procesos actuales, con el conocimiento de los resultados de procesos comparables del pasado geológico estimula el continuado interés por este método.

Perspectivas futuras

Es casi seguro que en el futuro se organizarán y coordinarán más cuidadosamente las aplicaciones de las computadoras a la ciencia de la Tierra, porque así lo pide la escala de actividades. En particular en la geología del petróleo se dispone ya de extensas colecciones de registros con datos tratables computacionalmente y se han establecido muchas bibliotecas con amplios programas geológicos.

La comunicación entre el geólogo y la computadora se ha mejorado introduciendo nuevas técnicas de programación y especialmente por el uso de gráficos computados interactivos [6]. Este reciente perfeccionamiento permite al geólogo situarse ante una pantalla, parecida a la de televisión, y examinar y manipular datos que aparecen como un mapa o un corte geológicos. El usuario puede manejar la computadora modificando los datos, o su representación, introduciendo instrucciones en su cuadro de mando, o indicando cambios con un ligero puntero sobre un determinado punto de la imagen. La reacción de la computadora aparece casi instantáneamente. Peikert (ver [6]) dice que cuando estos métodos se hagan más comunes, se llegará a la complementación del hombre con la máquina, aprovechando integramente las posibilidades de ambos. La capacidad del geólogo para reconocer modelos representativos y tomar decisiones lógicas complejas se combinará con la facilidad de la computadora para recoger información, realizar cálculos numéricos y producir imágenes.

Referencias

[1] Bickmore, D. P. *Geogrl Mag.*, **42**, 43, 1969.

[2] Dunham, K. C. *Q. Jl geol. Soc. Lond.*, **123**, 1, 1967.

[3] *Ibid. Idem.* **124**, 101, 1969.

[4] Harbaugh, J. W. y Merriam, D. F. «Computer Applications in Stratigraphic Analysis.» John Wiley, Nueva York. 1968.

[5] Krumbein, W. C. y Graybill, F. A. «An Introduction to Statistical Models in Geology.» McGraw-Hill, Nueva York. 1965.

[6] Merriam, D. F. (Compilador). «International Symposium on Computer Applications in the Earth Sciences.» Plenum Press, Nueva York. 1969.

[7] Miller, R. L. y Kahn, J. S. «Statistical Analysis in the Geological Sciences.» John Wiley, Nueva York. 1962.

[8] Robinson, J. E. y Charlesworth, H. A. K. *Kansas Geol. Survey Computer Contr.*, **40**, 1969.

[9] Watson, G. S. *J. Geol.*, **74**, 786, 1966.